

[电缆终端]

基于超声检测技术的电缆终端铅封缺陷仿真研究

文/梁俊熙 林龙标 熊屈 李晓东 徐铭堃
东莞市输变电工程建设有限责任公司

铅封是电缆终端附件重要部分，起着密封、连接电缆金属铝护套的作用。由于制作工艺或是受到外力的原因，铅封会出现松脱、开裂，严重影响到电网运行安全，因此开展基于超声相控阵技术的铅封缺陷检测研究。当用相控阵探头检测铅封时，由于铅封曲面结构，探头不能完全贴合铅封表面，会出现超声波束散射的现象，为揭示铅封内部超声波的传播特性，对铅封进行仿真。结果显示，通过探头接收的缺陷回波能够精确地识别出铅封中的缺陷及其具体位置；10 MHz频率检测铅封内部缺陷、7.5 MHz频率探测铅封与铝护套层间的缺陷效果最佳；从而证实超声相控阵技术在检测铅封缺陷方面的有效性。

铅封是电缆的关键组件，负责将电缆的金属铝护套或其终端头进行密封，以实现防水效果。如果铅封在安装时未达到标准，或在运行期间遭受外力作用，可能会导致其松动，从而使水分渗透进电缆内部，引起电缆的主绝缘性能退化，最终可能引发电缆的击穿故障。鉴于这些风险，对铅封进行缺陷检测显得尤为重要^[1-4]。

当前，多种技术如阻抗谱检测、涡流检测和交流电磁场检测等已应用于电缆附件铅封的缺陷检测中^[5]。然而，这些方法面临一些挑战，包括较低的检测灵敏度、数据处理复杂性、对环境干扰的敏感性以及操作限制，这些因素限制它们在高效精确检测铅封缺陷方面的应用。相比之下，超声相控阵检测技术展现出其独特的优势，包括高效率、灵活性、出色的分辨率和信噪比，以及操作的安全性和便捷性，这些特性使其成为检测电缆铅封缺陷的优先选择。

在检测铸造管道时，李阳利用超声相控阵技术，有效地评估管道内部的缺陷情况，显著提升缺陷的检测清晰度^[6]。赵熙来构建涡轮叶片的超声

相控阵检测有限元模型，通过分析缺陷回波的模式，实现对涡轮叶片复杂区域内部缺陷的精确定位^[7]。张继敏通过选择不同的探头、频率和聚焦技术，对加筋曲板结构进行相控阵超声仿形测量，实现复合材料结构中帽形加筋曲板缺陷的自动化检测流程^[8]。

在使用超声相控阵技术对铅封进行检测时，面临着由于铅封结构复杂和表面曲率大的挑战，使得超声探头难以完全接触铅封的曲面，从而可能引起声波的散射。考虑到铅封内部声波传播的复杂性，本研究选用COMSOL软件来执行声-固体耦合的仿真分析。仿真结果有助于理解铅封内部超声波的传播行为，为检测铅封内部可能存在的缺陷提供了一种有效方法。

超声相控阵检测原理

将多个规格统一且形状相同的小晶片，依照特定位置进行排列，形成一个换能器阵列，其中每个晶片都能够分别发出独立的超声波束。通过精确控制每个阵列晶片的相位、幅度和激励时间，可以合

成具有特定方向性的超声波束，形成聚焦声场。由于能够实现多个晶片的同步聚焦，相控阵超声探头在焦区的能量集中度上超越传统单晶探头。这一特性赋予了相控阵探头在检测过程中更高的灵敏度和分辨率。

超声相控阵声束聚焦方式的延迟时间计算方法可根据图1所示的几何关系得到。

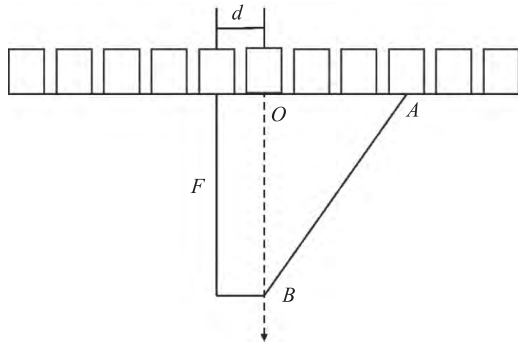


图1 相控阵声束聚焦几何关系图

假设阵列换能器有 $(2N+1)$ 个阵元，对于第 n 个阵元，在三角形OAB中有

$$OA = nd \quad (1)$$

$$AB^2 = F^2 + (nd)^2 \quad (2)$$

式中， d 为阵元中心间距； AB 为第 n 个阵元到焦点的距离； F 为聚焦深度。

则线阵中心与第 n 个阵元的声程差为

$$\Delta S = AB - F \quad (3)$$

当声速 c 是已知的，则第 n 个阵元的延迟时间为

$$t_n = \frac{\Delta S}{c} + t_0 \quad (4)$$

由式(1)和式(4)可得

$$t_n = \frac{F}{c} \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{nd}{F} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} + t_0 \quad (5)$$

式中， t_0 为一个避免产生负的延迟时间所加的常数； F 为聚焦深度； d 为相邻阵元中心间距； c 为超声波在介质中的传播速度。

超声检测中，介质中的声速用变量 c 表示。相控阵超声检测技术涉及激发接收单元、延时装置和探头阵元三个关键组件协同工作。①激发接收单元。该单元生成特定幅值的触发信号，并将其发送到延时装置。②延时器的功能。延时器依据聚焦规则为每个阵元计算发射时间延迟，调整脉冲宽度，以实

现信号在阵元间的同步和协调。不同阵元发射的声束因相位差异在空间中相互叠加，形成方向性明确的入射波阵面，完成声束聚焦。声束在材料中传播遇到缺陷时，会产生较大振幅的反射波。由于阵元在空间中的不同位置，同一缺陷产生的反射波到达各阵元的时间存在差异。延时装置计算接收聚焦所需的延迟，并对各阵元接收的回波信号进行整合^[14]。

超声相控阵的超声波束发射和缺陷回波接收示意图如图2所示。

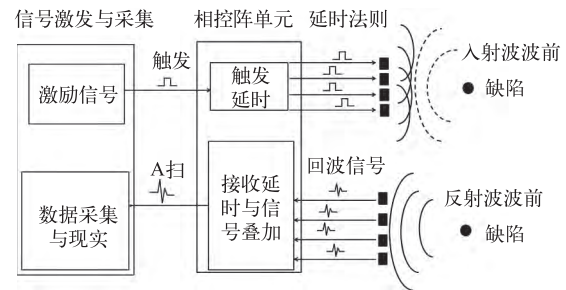


图2 超声波束发射和缺陷回波接收示意图

电缆终端铅封缺陷模型建立

鉴于构建和运行三维仿真模型所需的计算资源和时间成本较高，本研究选择更为高效的二维模型来简化计算过程。如图3所示，通过精心设计的边界条件，使得二维模型能够模拟出接近三维实体的物理行为。铅封模型的具体尺寸被精确设定，底部长度为10 cm，最大厚度为3 cm，这样的尺寸设定有助于更真实地反映实际铅封的物理特性。在模型中，特别关注内部缺陷对超声波传播特性的影响。为此，在模型中设置两种不同尺寸的缺陷：一种是直径为1 mm的内部缺陷；另一种是位于铅封与铝护套层交界处、直径为3 mm的缺陷。这些缺陷的设置旨在模拟实际应用中可能出现的不同类型的损伤。

为模拟超声波，在发射晶片上施加瞬态脉冲信号，其频率中心为15 MHz，如图4所示。在进行有限元数值模拟时，网格划分至关重要，它决定计算的准确性。对于声波问题的模拟，推荐的最大单元尺寸是最小波长的1/10~1/5。这样的网格划分既能确保计算准确度，又能避免因单元过小或内存不足导致的计算速度下降。

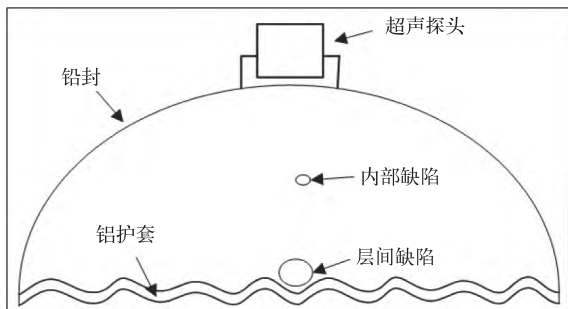


图3 超声检测铅封缺陷模型

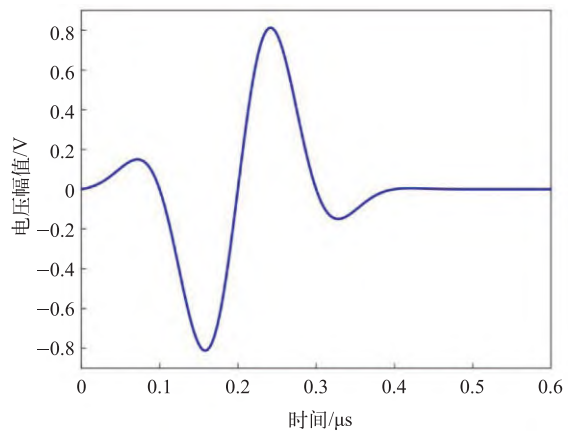


图4 激励信号波形图

仿真结果分析

在超声检测领域，缺陷的存在会在时间轴上产生明显的回波信号特征。这些特征不仅易于检测人员识别，而且对于理解缺陷的性质至关重要。由于缺陷的尺寸和形状的多样性，它们在超声回波中的表现形式也各不相同，这就要求在研究中对特征值进行精确定义。本研究通过深入分析，成功提取超声回波中的关键波形特征。这些特征能够准确揭示缺陷的特性，为后续的缺陷检测和分析提供坚实的基础。特别是，缺陷回波的幅值，作为与缺陷几何形状密切相关的参数，被选作特征值 A ，以便于量化分析。图5详细展示这一特征值提取过程，其中特征值 A 的确定为评估缺陷的大小和形状提供一种有效的方法。通过这种方法，可以更好地理解和预测缺陷对超声回波的影响，从而提高检测的准确性和可靠性。可在MATLAB软件中截取缺陷回波序列 x ，然后调用函数 $A=\max(|x|)$ 对缺陷回波峰值进行提取。

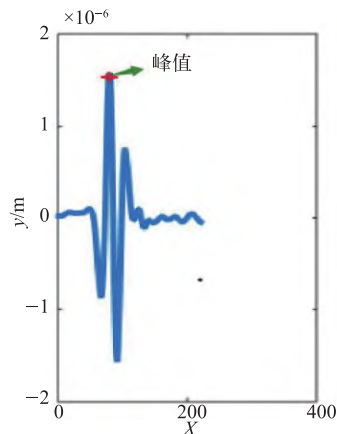


图5 缺陷回波峰值绝对值

1. 缺陷位置对缺陷检测的影响

本研究通过仿真方法模拟超声波在检测电缆终端铅封时对内部缺陷的探测效果，重点分析声波传播特性如何受铅封内缺陷的影响。以一个具体案例为基础，该案例中的缺陷位于铅封上表面下方10 mm的位置，直径为1 mm。

在本次仿真研究中，通过图6直观地展示声波在铅封材料内部传播过程中与缺陷相互作用的动态效果。在仿真的早期阶段，即2.7 μs 时，声波首次与缺陷接触。这一时刻标志着声波能量开始与缺陷相互作用，是后续反射和透射现象的起点。随着声波在缺陷处的反射，这些反射波在5.4 μs 时被探头成功接收。除了在缺陷处产生反射外，声波的一部分能量还会继续穿过缺陷，形成透射波。这些透射波在到达铅封底部的铝护套后发生反射，并在12.6 μs 时返回探头。

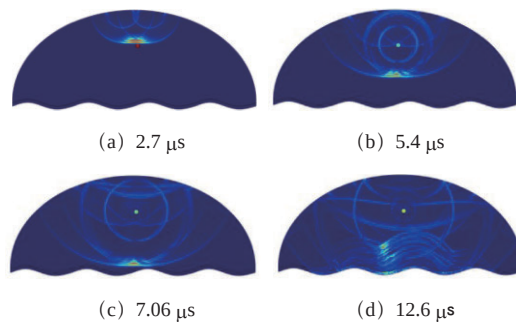


图6 内部缺陷瞬态声场分布图

此外，超声A扫描图像，如图7所示，在表面波和铝护套底面回波之间的1/3位置清晰地显示了内部缺陷的反射波，其位置与仿真模型预测的缺陷位置非常吻合。

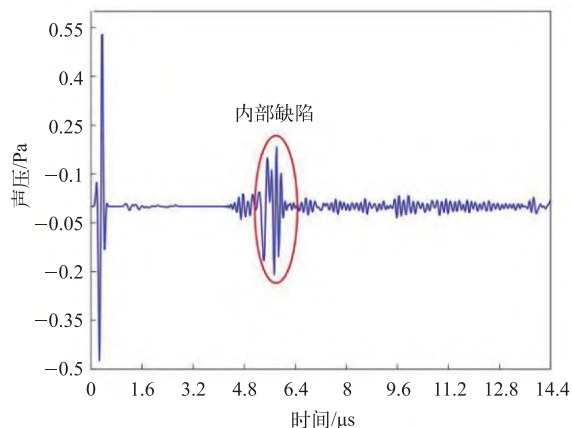


图7 铅封内部缺陷回波

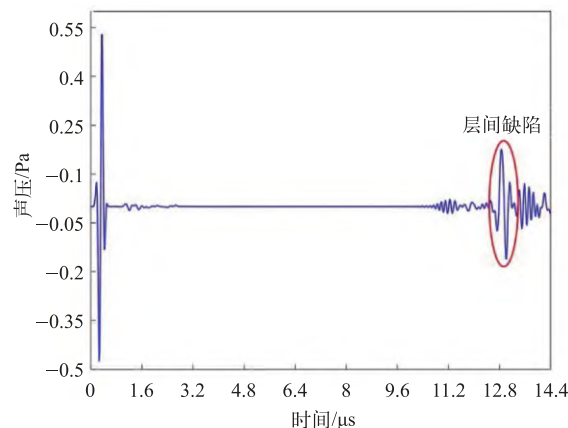


图9 铅封层间缺陷回波图

通过瞬态声场仿真，能够观察到声波在材料中的传播和相互作用，如图8所展示的仿真结果，提供了直观的声波行为视图。在仿真过程中，记录到在7.2 μs 时，声波首次与界面缺陷接触并引发反射现象，这是声波与材料不连续性相互作用的直接证据。这些反射的声波信号在12.8 μs 时被高准确度的相控阵探头成功接收，这一事件标志着声波已经完成了与缺陷的相互作用并返回到检测设备。超声A扫描波形图，如图9所示。在铝护套底面回波之前，注意到一个显著的高幅值回波，这个回波是由于声波在界面缺陷处反射造成的，其存在提供了缺陷位置的重要线索。高幅值回波的位置与在仿真模型中预测的层间缺陷位置非常一致，这验证了仿真模型的准确性和可靠性，也表明仿真结果与实际物理现象的一致性。层间缺陷的存在对超声波的传播产生了显著影响，导致在铝护套表面的回波信号出现明显的衰减，这种现象与声波在缺陷处的能量散射和吸收有关，为评估缺陷的性质和影响提供重要信息。

为深入理解铅封内部存在的多种缺陷类型如何影响超声波的传播特性，采取一种综合的研究方法，构建一个详细的模型。该模型不仅包括铅封内部的缺陷，还特别考虑层间缺陷的情况。通过使用先进的仿真技术，能够模拟超声波在铅封材料中的传播过程。仿真结果，包括内部声场的瞬态分布和超声A扫描波形，提供了直观的图像。这些图像详细展示了超声波在遇到不同类型缺陷时的行为。如图10和图11所示。观察结果表明，即使在存在多种缺陷的情况下，超声检测技术仍然能够有效地识别和定位这些缺陷。特别是除来自铅封底部的回波之外，由内部和层间缺陷产生的回波信号也非常清晰，且与仿真模型中预测的缺陷位置高度一致。这一发现证实超声检测技术在识别铅封内部缺陷方面的高准确性和可靠性。此外，研究还发现，尽管铅封内部可能存在多种不同类型的缺陷，但这些缺陷在超声检测过程中并不会相互干扰，从而保证检测结果的准确性。

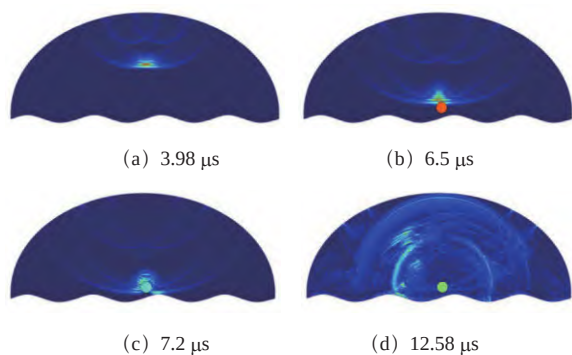


图8 层间缺陷瞬态声场分布图

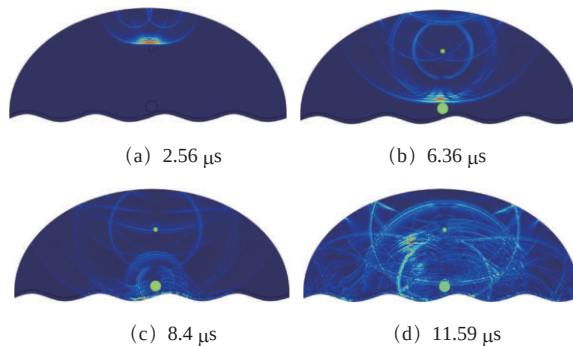


图10 内部和层间缺陷瞬态声场分布图

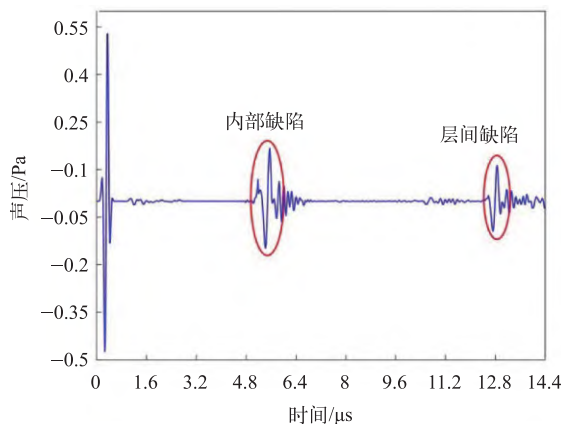


图11 铅封内部和层间缺陷回波图

2. 探头频率对缺陷检测的影响

研究指出, 探头发射的超声波频率对探测准确度有显著影响, 不同频率下探测深度和缺陷识别的准确性存在差异。鉴于电缆终端附件的复杂结构, 选择合适的探头频率对于提升铅封缺陷检测的精确度至关重要。如图12所示, 不同探头频率在铅封不同深度的增益补偿变化情况, 高频超声波在介质中的衰减速度较快。具体来说, 当超声波频率为10 MHz时, 对0~2 cm深度范围内的缺陷具有较高的探测准确度。但随着探测深度的增加, 超声波衰减加剧, 导致探测准确度显著下降。相比之下, 2.5 MHz频率的超声波在0~5 cm深度的探测准确度虽然不及5 MHz、7.5 MHz和10 MHz, 但在5~8 cm深度范围内的探测准确度却优于其他三种频率。鉴于铅封缺陷主要出现在1~4 cm深度, 因此在检测铅封内部缺陷时, 推荐使用10 MHz频率; 而在探测铅封与铝护套层间的缺陷时, 7.5 MHz频率是更合适的选择。

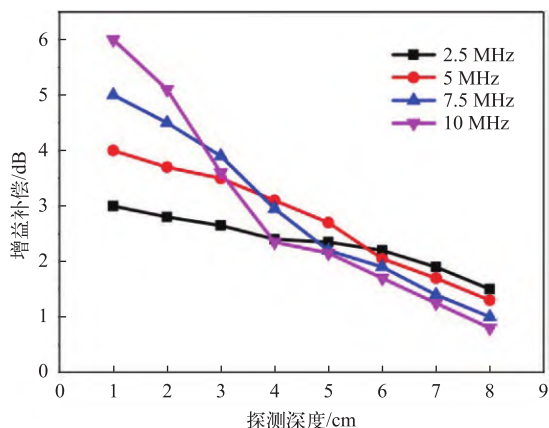


图12 不同超声频率的补偿增益

结束语

通过对铅封进行COMSOL仿真研究, 得到铅封内部声场瞬态分布图以及探头接收到的缺陷A扫描波形图。从A扫描波形图得知当铅封内部存在缺陷时, 缺陷回波在A扫描波形图中间, 即对应着缺陷在铅封内部的位置; 铅封层间存在缺陷时, 缺陷回波在A扫描波形图后部, 即对应着缺陷在铅封层间的位置; 铅封内部和层间均存在缺陷时, 缺陷回波在A扫描波形图出现两次, 即分别对应着内部缺陷和层间缺陷的位置。通过以上仿真研究, 证明超声相控阵检测铅封缺陷, 判断缺陷位置的可行性与适用性。

鉴于探头发射的超声波频率对探测准确度有显著影响, 因此在检测铅封内部缺陷时, 推荐使用10 MHz频率; 而在探测铅封与铝护套层间的缺陷时, 推荐使用7.5 MHz频率。EA

(收稿日期: 2024-09-18)

参考文献

- [1] 曹京荣, 查显光, 陈杰, 等. 220kV电缆线路终端故障及仿真分析[J]. 电力工程技术, 2018, 37(6): 151-155.
- [2] 吴明祥, 毛琳明. 一起220kV电缆终端击穿故障原因分析[J]. 浙江电力, 2012, 31(9): 10-12+20.
- [3] 沈金富. 电缆的铅封技术[J]. 建筑施工, 1983(2): 22-25.
- [4] 袁燕岭, 周灏, 等. 高压电力电缆护层电流在线监测及故障诊断技术[J]. 高电压技术, 2015, 41(4): 1194-1203.
- [5] 李郴飞. 热障涂层复阻抗谱影响参数的有限元模拟[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2015.
- [6] 李阳, 邓韬. 基于超临界火电机组铸造高压管道相控阵检测可检性研究[J]. 铸造, 2022, 71(10): 1305-1310.
- [7] 赵熙来. 涡轮叶片损伤缺陷超声相控阵自动化检测关键技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2023.
- [8] 张继敏, 肖鹏, 刘奎, 等. 复合材料帽形长桁加筋曲板的自动化相控阵超声检测技术研究[J]. 复合材料科学与工程, 2020(2): 91-96.